

Ophthalmologie 2020 · 117:721–729
<https://doi.org/10.1007/s00347-020-01103-8>
 Online publiziert: 28. April 2020
 © Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020



A. Händel¹ · C. Stern² · J. Jordan^{2,3} · T. Dietlein¹ · P. Enders¹ · C. Cursiefen¹

¹ Zentrum für Augenheilkunde, Universitätsklinik Köln, Köln, Deutschland

² Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, Deutschland

³ Lehrstuhl für Luft- und Raumfahrtmedizin, Universitätsklinik Köln, Köln, Deutschland

Augenveränderungen im All

Aktuelles zu Klinik, Pathogenese und Prävention

„Houston, we have a problem“: „We are losing our eyesight“ [26]. So lautet der Titel einer 2019 erschienenen Publikation, die eine Übersicht zu den Veränderungen am Auge bei längeren Aufenthalten im All gibt und widerspiegelt, welche zentrale Rolle die Erforschung dieser Veränderungen aktuell bei NASA (National Aeronautics and Space Agency), ESA (European Space Agency) und DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) spielt.

Die Augenveränderungen bei Astronautinnen und Astronauten sind mehr denn je im Fokus der Erforschung der astronautischen Raumfahrt, da sie längerfristigen Raummissionen mit Crews im Wege steht. Bei diesen Veränderungen kommt es u. a. zu einer Schwellung des Sehnervenkopfes und einem korrigierbaren Visusverlust. Es wird vermutet, dass Druckänderungen am Sehnervenkopf durch Verschiebungen des Liquordrucks sowie des intraokularen Drucks an der Genese der Erkrankung beteiligt sind. Diese Befunde sind unter dem sog. „space flight-associated neuro-ocular syndrome“ (SANS) zusammengefasst und konnten bei Astronautinnen und Astronauten während und nach Weltraummissionen nachgewiesen werden. Im folgenden Beitrag soll eine Übersicht über aktuellste Erkenntnisse über das SANS, insbesondere die Augenveränderungen, gegeben werden. Weiterhin sollen mögliche Gegenmaßnahmen er-

läutert werden und die Relevanz für die Forschung an terrestrischen ophthalmologischen Krankheitsbildern (z. B. Pseudotumor cerebri oder Glaukome) dargelegt werden.

„Space flight-associated neuro-ocular syndrome“ (SANS)

Die umfassende körperliche Untersuchung von Astronautinnen und Astronauten vor und nach Einsätzen im All zeigte eindrucksvolle Veränderungen des menschlichen Körpers. Diese Veränderungen werden unter dem sog. „space flight-associated neuro-ocular syndrome“ (SANS) zusammengefasst. Ursprünglich nannte man dieses Syndrom VIIP, was für „visual impairment and intracranial pressure“ steht [30].

Die Veränderungen, die man bei Raumfahrerinnen und Raumfahrern feststellen konnte, beinhalten uni- und bilaterale Papillenödeme (rechts häufiger als links, **Abb. 1**), Dickenzunahme der Optikusscheiden, hyperope Shifts, Bulbusabflachung, Aderhautfalten und Cotton-wool-Herde [14, 18, 19]. Aufgrund der diversen Veränderungen an den Augenstrukturen sowie des Gehirns etablierte sich der deskriptive Begriff des „space flight-associated neuro-ocular syndrome“. Diese klinischen Befunde im Rahmen des SANS wurden mittels Magnetresonanztomographie (MRT) mit intrakraniellen und intraorbitalen strukturellen Veränderungen, sowie Ultraschalluntersuchungen und OCT (optische Kohärenztomographie)-Untersuchungen (**Abb. 2**) korreliert.

Dennoch ist die Ursache nicht geklärt [13].

Mader et al. berichteten 2011, dass bei einer erheblichen Anzahl an Astronauten Augenveränderungen auftraten [19]. In dieser Publikation wurden bei 7 Astronauten nach Langzeitmissionen (6 Monate) die Augenbefunde analysiert, und 300 Astronautinnen und Astronauten bekamen nach einer abgeschlossenen Mission einen Fragebogen bezüglich Sehveränderungen während und nach dem Aufenthalt im All.

» Bei einer erheblichen Anzahl an Astronauten traten Augenveränderungen auf

Die 7 Astronauten erhielten sowohl vor als auch nach der Langzeitmission spezielle Augenuntersuchungen (Mydriasis, Refraktion, Fundusfotografie, OCT). Bei 5 von 7 Astronauten zeigten sich ein Papillenödem, eine Bulbusabflachung und Aderhautfalten und bei 3 von 7 Cotton-wool-Herde. Bei 6 von 7 Astronauten stellte sich in der OCT eine Verdickung der Nervenfaserschicht dar. Ein reduzierter Nahvisus konnte bei der gleichen Anzahl an Astronauten gemessen werden. Bei den Astronauten mit reduziertem Nahvisus zeigte sich bei 5 ein hyperoper Shift von $\geq +0,50$ dpt (sphärisches Äquivalent, in einem oder in beiden Augen, Range von $+0,50$ bis $+1,75$ dpt). Neben den speziellen Augenuntersuchungen wurde auch eine MRT durchgeführt. Bei diesen 5 Patienten mit hyperopen

Die Autoren A. Händel und C. Stern teilen sich die Erstautorenschaft. Die Autoren P. Enders und C. Cursiefen teilen sich die Seniorautorenschaft.

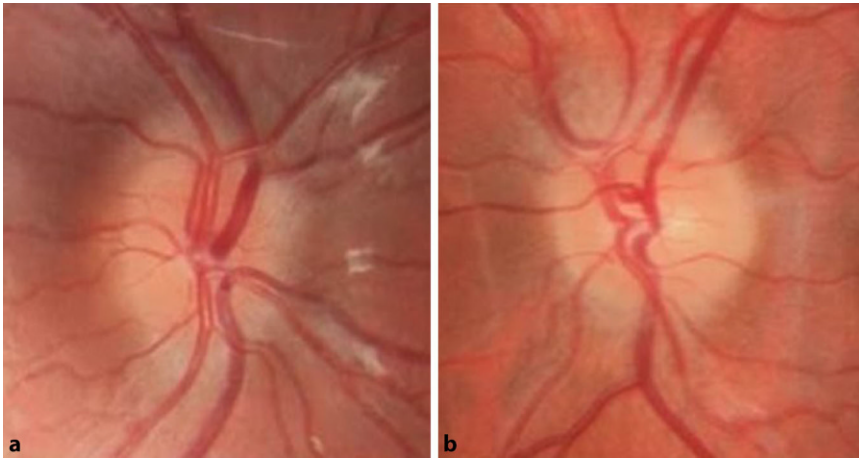


Abb. 1 ▲ Fundusfotografie mit Papillenödem. So können sich die fundoskopischen Befunde der Papille bei den Astronautinnen und Astronauten darstellen. Rechts ist häufiger betroffen als links. Hierbei handelt es sich um repräsentative Fundusfotografien von Patienten mit Papillenödem



Abb. 2 ▲ Der deutsche Astronaut der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) Alexander Gerst führt auf der internationalen Raumstation während der „Expedition 40“ (Mai 2014 bis September 2014) eine OCT (optische Kohärenztomographie)-Untersuchung durch, um im Rahmen des „Ocular Health Experiment“ die Augenveränderungen im All zu untersuchen. (Mit freundl. Genehmigung der ESA/NASA)

Shifts zeigte sich eine Bulbusabflachung in den MRT-Aufnahmen [19].

Lumbalpunktionen, die bei 4 von 7 Astronauten nach Rückkehr aus dem All durchgeführt wurden, zeigten einen leicht erhöhten Öffnungsdruck. Einschränkung muss man sagen, dass vor der Mission keine Lumbalpunktion durchgeführt wurde [19].

Erhebliche Augenveränderungen – teilweise nicht reversibel

Der Fragebogen, der 300 Astronautinnen und Astronauten, die bereits im All waren, ausgehändigt wurde, ergab, dass 29 % bei Kurzzeitmissionen und 60 %

bei Langzeitmissionen eine Verschlechterung des Sehens in Ferne und Nähe erlebten, die teilweise Jahre nach der Mission noch anhielten. Diese Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass Veränderungen an den Augen aufgrund eines (längerfristigen) Aufenthaltes im All auftreten können und diese nur teilweise reversibel sind [19]. Inwieweit Katarakte, die bisher einzig sicher nachgewiesene Folge erhöhter Strahlenexposition in der Raumfahrt, zur Sehverschlechterung beigetragen haben, kann anhand der Fragebögen nicht geklärt werden [3].

Neben diesen von Mader erstmalig beschriebenen ophthalmologischen Veränderungen gibt es noch weitere Berichte, sodass inzwischen mehr als 15 männli-

che Astronauten nach Langzeitmissionen Veränderungen im Sinne einer SANS zeigten [1]. Auch bei 8 von 16 russischen Kosmonautinnen und Kosmonauten zeigten sich Papillenödeme [20].

Pathophysiologie

Die Ursachen für die Augenbefunde sind weiterhin nicht geklärt. Große Aufmerksamkeit wird der Pathophysiologie der dokumentierten Papillenödeme gewidmet. Die klinische Entität des Papillenödems lässt sich in 3 verschiedene Kategorien unterteilen:

1. Papillenödem ohne primäre Axonschädigung (Stauungspapille, Stauungspapille e vacuo),
2. Papillenödem mit direkter Axonschädigung (Entzündung: Papillitis/Retrobulbärneuritis, Infarktgeschehen: ischämische Optikoneuropathie (nicht arteriell, arteriell)),
3. Papillenödem durch Infiltration (z. B. hämatologische Grunderkrankung) [9].

Initial wurde das Syndrom des SANS als VIIP („visual impairment and intracranial pressure“) bezeichnet. Man vermutete, dass die Entstehung des Papillenödems in Zusammenhang mit erhöhtem intrakraniellen Druck zu verstehen ist. Bis heute wurde jedoch nie der intrakranielle Druck von Astronautinnen oder Astronauten während des Aufenthaltes im All gemessen, sodass nicht sicher gesagt werden kann, dass ein Zusammenhang zu erhöhtem intrakraniellen Druck besteht.

Augenveränderungen ähnlich der idiopathischen intrakraniellen Hypertension?

In einer Publikation von Kramer et al., in der retrospektiv 27 Astronauten mittels MRT nach dem Aufenthalt im All untersucht wurden, zeigten sich unter anderem Dehnungen der Sehnervenscheiden, Bulbusabflachungen, Vorwölbungen des Sehnervenkopfes und erhöhter Durchmesser des Sehnerven. Man schlussfolgerte daraus, dass der lange Allaufenthalt zu Veränderungen ähnlich der idiopathischen intrakraniellen Hypertension (IIH) führen kann [8].

Hier steht eine Anzeige.



Ophthalmologie 2020 · 117:721–729 <https://doi.org/10.1007/s00347-020-01103-8>
© Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

A. Händel · C. Stern · J. Jordan · T. Dietlein · P. Enders · C. Cursiefen

Augenveränderungen im All. Aktuelles zu Klinik, Pathogenese und Prävention

Zusammenfassung

Hintergrund. Mehr denn je rückt die Erforschung der Veränderungen am Auge, die durch den Aufenthalt im All verursacht werden, ins Zentrum des Interesses der internationalen und nationalen Weltraumagenturen NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency) und DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Neben weltraumstrahlungsbedingten Katarakten können erhebliche Augenveränderungen, zusammengefasst unter dem „space flight-associated neuro-ocular syndrome“ (SANS), auftreten. **Ziele der Arbeit.** Diese Übersicht soll den aktuellen Forschungsstand und künftige Bestrebungen auf dem Gebiet der Erforschung der Augenveränderungen bei SANS wieder-

geben und die Relevanz für die terrestrische ophthalmologische Forschung aufzeigen.

Material und Methoden. Es erfolgt eine Analyse der bestehenden Publikationen zu dem Thema in PubMed sowie von Berichten bezüglich des Risikos von SANS, veröffentlicht von der NASA der USA.

Ergebnisse. Die Ursachen für die Entstehung der Augenveränderungen im All sind nicht geklärt. Faktoren wie die Erhöhung des intrakraniellen Drucks, Flüssigkeitsverschiebungen, Hyperkapnie und genetische Einflüsse sind Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen. Ein terrestrisches Modell zur Induktion des Papillenödems konnte etabliert werden (Bettruhestudien mit -6° Kopftieflagerung als Weltraumanalogon). Gegenmaßnahmen

zur Entwicklung der Augenveränderungen, wie beispielsweise intermittierend künstliche Schwerkraft, sind Gegenstand der aktuellen Studien.

Schlussfolgerung. Die Erforschung von SANS im Rahmen von Bettruhestudien wird in Zukunft sowohl für die Weltraumforschung als auch für die terrestrische Forschung weitere wichtige Erkenntnisse liefern. Klinische Forschungsprojekte können aus der Weltraumforschung abgeleitet werden.

Schlüsselwörter

Space flight-associated neuro-ocular syndrome · Papillenödem · Intrakranieller Druck · Intraokularer Druck · Bettruhestudien

Eye changes in space. New insights into clinical aspects, pathogenesis and prevention

Abstract

Background. More than ever research into changes in the eye caused by long-term space flight is becoming the focus of the international and national space agencies National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Space Agency (ESA) and German Aerospace Center (DLR). In addition to space radiation-induced cataract formation considerable eye changes, summarized under space flight-associated neuro-ocular syndrome (SANS), can occur. **Objective.** This article gives an overview of the current state of research and future directions in the field of research concerned with ocular

alterations in SANS and presents the relevance for terrestrial ophthalmological research.

Material and methods. An analysis of existing publications on SANS in PubMed and reports on the risk of SANS published by the NASA of the USA was carried out.

Results. The reasons for the development of the eye changes in space have not been clarified. Factors such as the increase in intracranial pressure, fluid shifts, hypercapnia and genetic factors are the subject of intensive research efforts. A terrestrial model for the induction of papilledema could be established (bed rest studies with -6° head-down tilt

as a space analogue). Countermeasures for the development of eye changes, such as intermittent artificial gravity, are the subject of current research studies.

Conclusion. Research into SANS as part of bed rest studies will provide further important insights in the future for space research and also for terrestrial research. Clinical research projects can be derived from space research.

Keywords

Space flight-associated neuro-ocular syndrome · Papilledema · Intracranial pressure · Intraocular pressure · Bed rest studies

Einige der Augenbefunde können jedoch nicht erhöhtem intrakraniellen Druck zugeordnet werden, wie beispielsweise die Einseitigkeit des Auftretens von Papillenödem. Zudem waren die Liquoröffnungsdrücke nur grenzwertig erhöht, und chronische Kopfschmerzen traten bei den Astronauten nicht auf. Daher wurde vom Erklärungsansatz, SANS mit einer IIH gleichzusetzen, wieder Abstand genommen [15, 27].

Wie entsteht das Papillenödem?

Einige Arbeiten, die sich mit der terrestrischen Erforschung des Papillenödems

beschäftigen, widmen sich der Frage, ob die Entstehung eines Papillenödems unmittelbar mit einem erhöhten intrakraniellen Druck zusammenhängt. Ein möglicher Erklärungsansatz für die Entstehung eines Papillenödems ist, dass sich erhöhter intrakranieller Druck auf den Sehnerv umgebenden Subarachnoidalraum überträgt [7, 21]. Zumeist wird die Diagnose eines erhöhten intrakraniellen Drucks mittels Lumbalpunktion gestellt. Das Konzept des kontinuierlichen Liquorflusses geht davon aus, dass alle Liquorräume frei kommunizieren und der Liquordruck im gesamten Zentralnervensystem gleich ist. Dieses Konzept er-

klärt jedoch nicht, weshalb ein erhöht gemessener Liquordruck bei einigen Patienten nicht zu einem Papillenödem führt oder warum sich das Papillenödem bei manchen Patienten sehr asymmetrisch darstellt [7].

Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür ist die Trennung des Subarachnoidalraums des Sehnervs von anderen Liquorkompartimenten durch feine Septierungen, was zu einem lokalisierten Optikusscheiden-Kompartmentsyndrom führen könnte [6]. Das Konzept der Kompartimentierung des Subarachnoidalraums des Sehnervs, das unter bestimmten Umständen zu einem „toxi-



Abb. 3 ▲ Während eines mehr als 6 h dauernden Außenboardeinsatzes an der internationalen Raumstation (ISS) ist hier der deutsche Astronaut der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), Alexander Gerst, zu sehen. Welche Augenveränderungen infolge der Schwerelosigkeit entstehen, wurde u. a. auf dieser Expedition 41 (September 2014 bis November 2014) untersucht. (Mit freundl. Genehmigung der ESA/NASA)



Abb. 4 ▲ Der deutsche Astronaut Alexander Gerst (ESA) führt auf der internationalen Raumstation (ISS) eine Augenuntersuchung zur Fundusfotografie bei sich selbst durch. (Mit freundl. Genehmigung der ESA/NASA)

schen Milieu“ führen kann, wird z. T. als Erklärungsansatz für die Veränderungen am Sehnerv bei Astronauten verwendet.

Eine weitere Hypothese vermutet als Ursache des Papillenödems das Eindringen von umgebender Liquorflüssigkeit in den Sehnerv und die Papille entlang der perivaskulären Räume, die die zentralen Netzhautgefäße umgeben. Flüssigkeitsverschiebungen infolge der lang andauernden Mikrogravitation, Variationen der Anatomie und Dehnbarkeit der Optikusscheiden könnten hierbei begünstigende Faktoren sein [28].

Auch andere Faktoren, wie die erhöhte CO₂(Kohlendioxid)-Konzentration auf der Raumfahrtstation oder eine salzhaltige Diät, könnten Augenveränderungen begünstigen. Außerdem wird vermutet, dass unterschiedliche genetische Prädispositionen bei Astronautinnen und Astronauten über Veränderungen in spezifischen Stoffwechselwegen unter Mikrogravitation mit Sehveränderungen einhergehen. [31, 32]. Der mögliche Einfluss des lymphatischen und venösen Systems auf SANS ist bisher wenig untersucht [2, 5, 6, 16].

Die Pathophysiologie ist nicht abschließend geklärt und wird daher aktuell von NASA, ESA und DLR intensiv beforscht.

Warum ist SANS von so großem Interesse für die astronautische Raumfahrt?

Warum rücken diese Veränderungen in den Fokus der Weltraumforschung? Längere Aufenthalte auf der internationalen Raumstation („International Space Station“ [ISS]) (Abb. 3), erneute und länger andauernde Mondmissionen oder gar eine Mission zum Mars stellen langfristige Ziele von NASA und ESA dar. Eine akute oder gar persistierende Seh-minderung gilt es daher zu vermeiden, und entsprechende Gegenmaßnahmen sollen etabliert werden. Neben der Erhebung von Daten beispielsweise auf der ISS (Abb. 4) gibt es groß angelegte Studien für die Erforschung von SANS auf der Erde.

Aktuelle Forschungsansätze für ein besseres Verständnis des SANS

Kopftieflagerungsstudien

Ziel von Bettruhestudien in Kopftieflage ist es, die Wirkung der Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper auf der Erde zu simulieren. Hier hat sich gezeigt, dass eine –6° Kopftieflagerung – das ganze Bett wird dabei gekippt – Volumenverschiebungen im Körper bewirkt, die den Veränderungen im All ähnlich sind.

Außerdem treten physiologische Veränderungen infolge von Immobilisierung und Inaktivität auf, wie dies auch im All ohne geeignete Gegenmaßnahmen der Fall ist [22]. Diese sog. Bettruhestudien werden seit mehr als 20 Jahren durchgeführt und dauern teilweise bis zu 2 Monate, in denen die Probanden in dieser –6° Liegeposition mit Kopf nach unten dauerhaft liegen.

Bettruhestudien als Weltraumanalogon

In den Bettruhestudien von Tabbibi et al. von 2013, 2014 und 2016, bei denen die Probanden über einen unterschiedlichen Zeitraum (teilweise bis zu 70 Tagen) im Weltraumanalogon von –6° Kopf tief lagerten, konnten keine Seh-minderungen oder Papillenödeme festgestellt werden, wohl aber eine Verdickung der retinalen Nervenfaserschichtdicke („retinal nerve fiber layer“ [RNFL], Abb. 5) und ein leichter Anstieg des intraokularen Drucks, der nach dem Experiment wieder auf das Baseline-Niveau sank. Es zeigte sich, dass die Verdickung der RNFL zeitabhängig ist (je länger die Studie dauerte, desto dicker die RNFL [2014: 14 Tage Studiendauer, 2016: 70 Tage Studiendauer]) [24, 25].

Eine andere Gruppe um Laurie et al. hingegen konnte in der Forschungsanlage :envihab des Deutschen Zentrums für

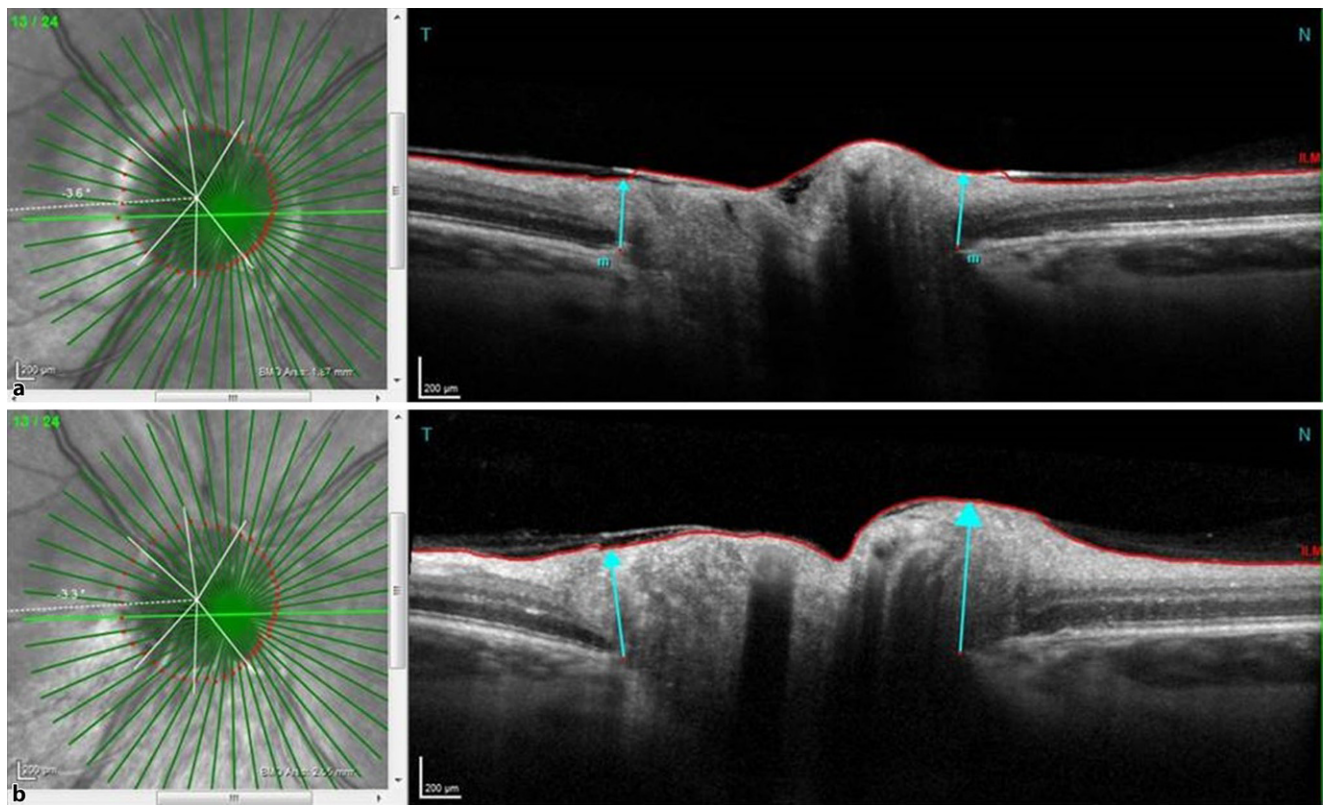


Abb. 5 ▲ Zunahme der retinalen Nervenfaserschichtdicke (RNFL) in einem OCT(optische Kohärenztomographie)-Scan. So kann sich die Zunahme der RNFL am Sehnervenkopf vor (a) und nach (b) längeren Allaufenthalten darstellen. Grüne prominente Linie: Lokalisation des OCT-Scans auf der rechten Bildhälfte; blauer Pfeil: RNFL; rote Linie: ILM (Membrana limitans interna). Hierbei handelt es sich um repräsentative OCT-Scans eines Patienten mit Papillenödem

Luft- und Raumfahrt (DLR) nach 30 Tagen Bettruhe in -6° Kopftieflagerung Papillenödeme nachweisen [11]. Bei 5 von 11 Probandinnen und Probanden konnte ein Papillenödem erstmalig durch das DLR fundoskopisch nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den Bettruhestudien von Tabbibi et al. wurde dieses Experiment in leicht hyperkapnischer Umgebung (0,5 %) durchgeführt, und die Probanden erhielten keine Kopfkissen. Andere, für SANS typische Augenbefunde, wurden nicht nachgewiesen. Somit konnte mithilfe dieses Versuchsaufbaus experimentell ein Papillenödem induziert werden [11].

» Das Modell mit Kopftieflagerung gilt in der Wissenschaft als valides Modell

Eine weitere Studie von Laurie et al. [10] vergleicht die Augenbefunde von Astronauten, die vor und während des Aufent-

halts im All dokumentiert wurden, mit den durch die Kopftieflagerung induzierten Augenveränderungen im Rahmen einer Bettruhestudie. Es zeigte sich, dass Astronauten nicht in dem Ausmaß Papillenödeme entwickelten wie durch Bettruhestudien induziert [23]. Die Aderhautdicke war bei Astronauten verdickt, bei Probanden nicht. Als mögliche Erklärungen für die Unterschiede werden angeführt, dass der intrakranielle Druck über die Dauer der Studie bei Probanden im Rahmen einer Bettruhestudie insgesamt höher sein könnte als bei Astronautinnen und Astronauten und damit die Entstehung und die Ausprägung des Papillenödems mit beeinflussen könnte. Für die Unterschiede der Aderhautdicke werden die vorhandenen Gravitationsgradienten bei den Probanden aus den Bettruhestudien als mögliche Erklärung angeführt. Unter Weltraumbedingungen fehlen die Gravitationsgradienten. Auch wenn möglicherweise unterschiedliche Mechanismen zur Entstehung des Papil-

lenödems im All und im terrestrischen Modell beitragen, wird das Modell mit Kopftieflagerung in der Wissenschaft als valides Modell angesehen [10]. Durch die Etablierung dieses Modells können nun mögliche Gegenmaßnahmen untersucht und die Pathophysiologie eines Papillenödems sowohl von Astronauten als auch von Patienten auf der Erde künftig intensiver erforscht werden.

Hyperkapnie

Die Einflüsse von milder Hyperkapnie, wie sie auf der Raumfahrtstation vorzufinden ist, wird als möglicher Einflussfaktor diskutiert. Eine von Laurie et al. 2017 [12] erschienene Bettruhestudie, die wiederum im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt wurde, konnte keinen zusätzlichen Einfluss einer erhöhten Konzentration von CO_2 auf die Augenveränderungen nachweisen. Die Studie legt nahe, dass die Kombination aus CO_2 und Kopftief-

lagerung keinen zusätzlichen Einfluss auf die Entwicklung von Veränderungen am Auge hat und auch der intrakranielle Druck durch die Exposition von erhöhten CO₂-Leveln nicht zusätzlich beeinflusst wird. Der Einfluss einer chronischen CO₂-Exposition wurde bisher noch nicht untersucht. Der Einfluss von Hyperkapnie ist somit nicht abschließend geklärt.

Prävention und Therapie

Künstliche Schwerkraft als mögliche Gegenmaßnahme?

Mit Etablierung des Modells der Kopftiefenlagerung und einer Induzierung von Papillenödem besteht die Möglichkeit, Gegenmaßnahmen an Probanden zu untersuchen, um diese dann in Zukunft auch bei Astronauten anwenden zu können. Als eine mögliche Gegenmaßnahme gilt intermittierende künstliche Schwerkraft. Diese kann mittels einer Kurzarm-Humanzentrifuge erzeugt werden. Der Organismus (insbesondere Herz und Gefäße) adaptiert sich an die Mikrogravitation, da der fehlende transmurale Druck entlang der Gefäße zu einem Remodelling führt. Tägliche intermittierende künstliche Schwerkraft kann diese Adaptation der Gefäße wie auch die kardiovaskuläre Dekonditionierung verhindern [4, 29]. Bisher gibt es noch keine Publikationen, die den Einfluss von künstlicher Schwerkraft auf das durch Bettruhestudien induzierte Papillenödem untersuchen. Ein weiterer interessanter Ansatz ist die Einwirkung von Unterdruck auf den Unterkörper. Dies wurde an Probanden im Rahmen von Bettruhestudien untersucht. Die Ergebnisse legen nahe, dass durch einen Unterdruck im Bereich der unteren Körperhälfte der durch die Kopftiefenlagerung induzierte Anstieg von Augeninnendruck und intrakraniell Druck abgeschwächt werden kann [17].

Zusammenfassend zeigt diese Übersicht, wie wichtig die Erforschung der Veränderungen am Auge für die astronautische Raumfahrt ist und in Zukunft wohlmöglich noch stärker ins Zentrum rücken wird. Hierfür ergeben sich nicht nur spannende Erkenntnisse, die für die

Hier steht eine Anzeige.



astronautische Raumfahrt von großem Interesse sein werden, sondern auch für unsere Patienten im klinischen Alltag sowie für die Initiierung von weiteren Studien wie beispielsweise auf dem Gebiet der Neuroophthalmologie oder Glaukomatologie.

Fazit für die Praxis

- Die Erforschung des SANS („space flight-associated neuro-ocular syndrome“) ist mehr denn je im Fokus von NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency) und DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).
- Uni- und bilaterale Papillenödeme (rechts häufiger als links), Verbreiterung der Optikusscheiden, hyperope Shifts, Bulbusabflachung, Aderhautfalten und Cotton-wool-Herde sind Befunde, die bei Astronautinnen und Astronauten nach Aufenthalt im All auftreten können.
- Die Augenveränderungen können im Rahmen von Bettruhestudien mit -6° Kopftieflagerung untersucht werden („terrestrisches Äquivalent“).
- Die Veränderungen auf den Körper im Rahmen von Kopftieflage-Bettruhestudien gelten als Welt- raumanalogon. Es gelingt dadurch die Induktion von Papillenödemem.
- Durch Etablierung dieses Modells können mögliche Gegenmaßnahmen (z. B. künstliche Schwerkraft mittels Kurzarm-Humanzentrifuge) untersucht werden.
- Die Beforschung dieser Augenveränderungen liefert Erkenntnisse, die von großer Relevanz für die terrestrische Forschung, insbesondere auf dem Gebiet der Glaukomatologie und Neuroophthalmologie, sind.

Korrespondenzadresse

Dr. med. A. Händel
Zentrum für Augenheilkunde, Universitätsklinik Köln
Kerpener Str. 62, 50937 Köln, Deutschland
alexander.haendel@uk-koeln.de

Förderung. Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), DFG FOR 2240 „(Lymph)Angiogenesis And Cellular Immunity In Inflammatory Diseases Of The Eye“ (www.for2240.de).

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. A. Händel, C. Stern, J. Jordan, T. Dietlein, P. Enders und C. Cursiefen geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts, über die Patienten zu identifizieren sind, liegt von ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern eine schriftliche Einwilligung vor.

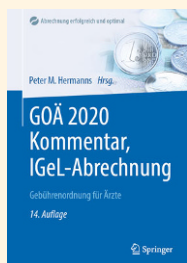
Literatur

1. Alexander DJ, Hamilton DR, Lee SMC, Mader TH, Otto C, Oubre CM, Pass AF, Platts SH, Scott JM, Smith SM, Stenger MB, Westby CM, Zanello SB (2012) Evidence report: risk of spaceflight-induced Intracranial hypertension and vision alterations. NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston
2. Chen L, Elias G, Yostos MP et al (2015) Pathways of cerebrospinal fluid outflow: a deeper understanding of resorption. *Neuroradiology* 57:139–147
3. Chylack LT Jr., Peterson LE, Feiveson AH et al (2009) NASA study of cataract in astronauts (NASCA). Report 1: cross-sectional study of the relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat Res* 172:10–20
4. Hargens AR, Bhattacharya R, Schneider SM (2013) Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. *Eur J Appl Physiol* 113:2183–2192
5. Johnston M, Zakharov A, Koh L et al (2005) Subarachnoid injection of Microfil reveals connections between cerebrospinal fluid and nasal lymphatics in the non-human primate. *Neuropathol Appl Neurobiol* 31:632–640
6. Killer HE, Jaggi GP, Flammer J et al (2006) The optic nerve: a new window into cerebrospinal fluid composition? *Brain* 129:1027–1030
7. Killer HE, Jaggi GP, Miller NR (2009) Papilledema revisited: is its pathophysiology really understood? *J Clin Exp Ophthalmol* 37:444–447
8. Kramer LA, Sargsyan AE, Hasan KM et al (2012) Orbital and intracranial effects of microgravity: findings at 3-T MR imaging. *Radiology* 263:819–827
9. Lang G (2019) Augenheilkunde, 6. Aufl. Thieme, Stuttgart
10. Laurie SS, Lee SMC, Macias BR et al (2019) Optic disc edema and choroidal engorgement in astronauts during spaceflight and individuals exposed to bed rest. *JAMA Ophthalmol*. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2019.5261>
11. Laurie SS, Macias BR, Dunn JT et al (2019) Optic disc edema after 30 days of strict head-down tilt bed rest. *Ophthalmology* 126:467–468
12. Laurie SS, Vizzeri G, Taibbi G et al (2017) Effects of short-term mild hypercapnia during head-down tilt on intracranial pressure and ocular structures in healthy human subjects. *Physiol Rep*. <https://doi.org/10.14814/phy2.13302>
13. Lee AG, Mader TH, Gibson CR et al (2017) Space flight-associated neuro-ocular syndrome. *JAMA Ophthalmol* 135:992–994
14. Lee AG, Tarver WJ, Mader TH et al (2016) Neuro-ophthalmology of space flight. *J Neuroophthalmol* 36:85–91
15. Linden C, Qvarlander S, Johannesson G et al (2018) Normal-tension glaucoma has normal Intracranial pressure: a prospective study of Intracranial pressure and Intraocular pressure in different body positions. *Ophthalmology* 125:361–368
16. Ma Q, Ineichen BV, Detmar M et al (2017) Outflow of cerebrospinal fluid is predominantly through lymphatic vessels and is reduced in aged mice. *Nat Commun* 8:1434
17. Macias BR, Liu JH, Grande-Gutierrez N et al (2015) Intraocular and intracranial pressures during head-down tilt with lower body negative pressure. *Aerosp Med Hum Perform* 86:3–7
18. Mader TH, Gibson CR, Lee AG (2016) Choroidal folds in astronauts. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 57:592
19. Mader TH, Gibson CR, Pass AF et al (2011) Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology* 118:2058–2069
20. Mayasnikov Vi SS (2008) Features of cerebral hemodynamics in cosmonauts before and after flight on the MIR Orbital Station Bd. 2. Orbital Station MIR. Institute of Biomedical Problems, State Scientific Center of Russian Federation, Moscow
21. Morgan WH, Balaratnasingam C, Lind CR et al (2016) Cerebrospinal fluid pressure and the eye. *Br J Ophthalmol* 100:71–77
22. Pavy-Le Traon A, Heer M, Narici MV et al (2007) From space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986–2006). *Eur J Appl Physiol* 101:143–194
23. Stenger MB, Brunstetter T, Gibson CR, Laurie SS, Lee SMC, Macias BR, Otto C, Smith SM, Zwart SR (2017) Human research program evidence report: risk of spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS). NASA, Lyndon B Johnson Space Center, Houston
24. Taibbi G, Cromwell RL, Zanello SB et al (2016) Ocular outcomes comparison between 14- and 70-day head-down-tilt bed rest. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 57:495–501
25. Taibbi G, Cromwell RL, Zanello SB et al (2014) Ocular outcomes evaluation in a 14-day head-down bed rest study. *Aviat Space Environ Med* 85:983–992
26. Wostyn P (2019) “Houston, we have a problem”: “we are losing our eyesight”. *Exp Eye Res* 186:107725
27. Wostyn P, De Deyn PP (2018) Why space flight-associated Neuro-ocular syndrome May differ from idiopathic Intracranial hypertension. *JAMA Ophthalmol* 136:451–452
28. Wostyn P, Mader TH, Gibson CR et al (2019) The escape of retrobulbar cerebrospinal fluid in the astronaut's eye: mission impossible? *Eye* 33:1519–1524
29. Zhang LF (2013) Region-specific vascular remodeling and its prevention by artificial gravity in weightless environment. *Eur J Appl Physiol* 113:2873–2895
30. Zhang LF, Hargens AR (2018) Spaceflight-induced Intracranial hypertension and visual impairment: pathophysiology and countermeasures. *Physiol Rev* 98:59–87
31. Zwart SR, Gibson CR, Mader TH et al (2012) Vision changes after spaceflight are related to alterations

- in folate- and vitamin B-12-dependent one-carbon metabolism. J Nutr 142:427–431
32. Zwart SR, Laurie SS, Chen JJ et al (2019) Association of genetics and B vitamin status with the magnitude of optic disc edema during 30-day strict head-down tilt bed rest. JAMA Ophthalmol. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2019.3124>

Lesetipp

Aktuelle Buchempfehlungen aus dem Springer-Verlag



GOÄ 2020 Kommentar, IGeL-Abrechnung

Gebührenordnung für Ärzte
Hermanns, Peter M. (Hrsg.)
XXIV, 896 Seiten
2020 | 14. Auflage
Springer-Verlag
978-3-662-60547-9 (ISBN)
79,99 €



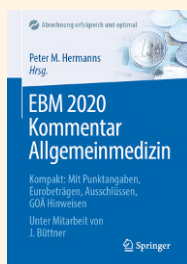
UV-GOÄ 2020 Kommentar

Mit den neuen Preisen vom 1.10.2019
Hermanns, Peter M., Schwartz, Enrico (Hrsg.)
XXIII, 767 Seiten
2020 | 19. Auflage
Springer-Verlag
978-3-662-60549-3 (ISBN)
69,99 €



EBM 2020 Kommentar Kinderheilkunde

Kompakt: Mit Punktabgaben, Eurobeträgen, Ausschlüssen, GOÄ Hinweisen
Hermanns, Peter M. (Hrsg.)
XX, 429 Seiten
2020
Springer-Verlag
978-3-662-61465-5 (ISBN)
39,99 €



EBM 2020 Kommentar Allgemeinmedizin

Kompakt: Mit Punktabgaben, Eurobeträgen, Ausschlüssen, GOÄ Hinweisen
Hermanns, Peter M. (Hrsg.)
XX, 411 Seiten
2020 | 1. Aufl. 2020
Springer-Verlag
978-3-662-61501-0 (ISBN)
39,99 €



EBM 2020 Kommentar Innere Medizin mit allen Schwerpunkten

Kompakt: Mit Punktabgaben, Eurobeträgen, Ausschlüssen, GOÄ Hinweisen
Hermanns, Peter M. (Hrsg.)
XXII, 685 Seiten
2020 | 1. Aufl. 2020
Springer-Verlag
978-3-662-61503-4 (ISBN)
49,99 €